

УДК 621.315

В.М.ЗОЛОТАРЕВ, канд.техн.наук, ген.директор, ЗАО завод «Южкабель», Харьков

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 330 кВ

Викладені практичні аспекти вирішення проблеми створення виробництва в Україні кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену.

The practical aspects of designing XLPE-cable in Ukraine are described.

Концентрация электрических мощностей на современном этапе развития достигла такой степени, что необходимы кардинальные решения в области совершенствования канализации энергопоток. На сегодняшний день решать задачи передачи и особенно распределения электроэнергии с помощью одних только традиционно применяемых для этой цели открытых воздушных ЛЭП становится практически невозможно. Все возрастающие требования ставят на повестку дня необходимость сооружения современных безопасных каналов передачи электрической энергии в виде кабельных линий. Основной элементной базой последних являются современные силовые кабели энергетического назначения, а разработка и освоение их выпуска напрямую связаны с повышением надежности и безопасности отечественных кабельных линий электропередачи.

Суть проблемы. На момент обретения независимости в Украине выпускались в основном силовые кабели с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение до 10 кВ с секторными жилами, кабели с изоляцией из линейного полиэтилена с секторными жилами на напряжение до 3 кВ или с круглыми жилами на напряжение до 10 кВ. Силовые кабели с ПВХ изоляцией выпускались максимум на напряжение в 6 кВ. Все эти кабели являлись трехжильными и имели сечение жилы до 240 мм² и невысокую теплостойкость, что не удовлетворяло потребностям отечественной электроэнергетики и в первую очередь в части рабочих напряжений, низких эксплуатационных качеств и низких передаваемых мощностей. Главным препятствием на пути совершенствования существующих и создания новых конструкций кабелей и повышения их пара-

метров было отсутствие промышленных технологий переработки и наложения нагревостойкой изоляции с высокими диэлектрическими свойствами. С освоением химических предприятиями выпуска компонент, позволяющих с помощью их экструзионной переработки получать непосредственно на кабельных предприятиях сшитый полиэтилен, появились широкие возможности освоения новых технологий изготовления силовых кабелей энергетического назначения, и кардинального улучшения их технико-экономических показателей в целом.

Решение проблемы. Повышение технико-экономических показателей силовых кабелей энергетического назначения проводилось следующими путями:

- усовершенствование существующих конструкций кабелей и использование для их изготовления новых технологий;
- разработка новых конструкций экранированных кабелей;
- разработка и использование новых первичных компонент;
- построение новых технологических схем, принципов и циклов производства;
- разработка новых электротехнологических комплексов массового производства кабелей;
- разработка нормативной базы;
- разработка испытательной базы.

В общей схеме основных технологических процессов (рис. 1) можно выделить следующие структурные части: первичные компоненты, цикл изготовления сплошных токопроводящих жил (ТПИС) малых сечений и проволоки, циклы изготовления кабелей на напряжение до 10 кВ, напряжением 6...110 кВ и на напряжение до 330 кВ, а также цикл переработки отходов, которые

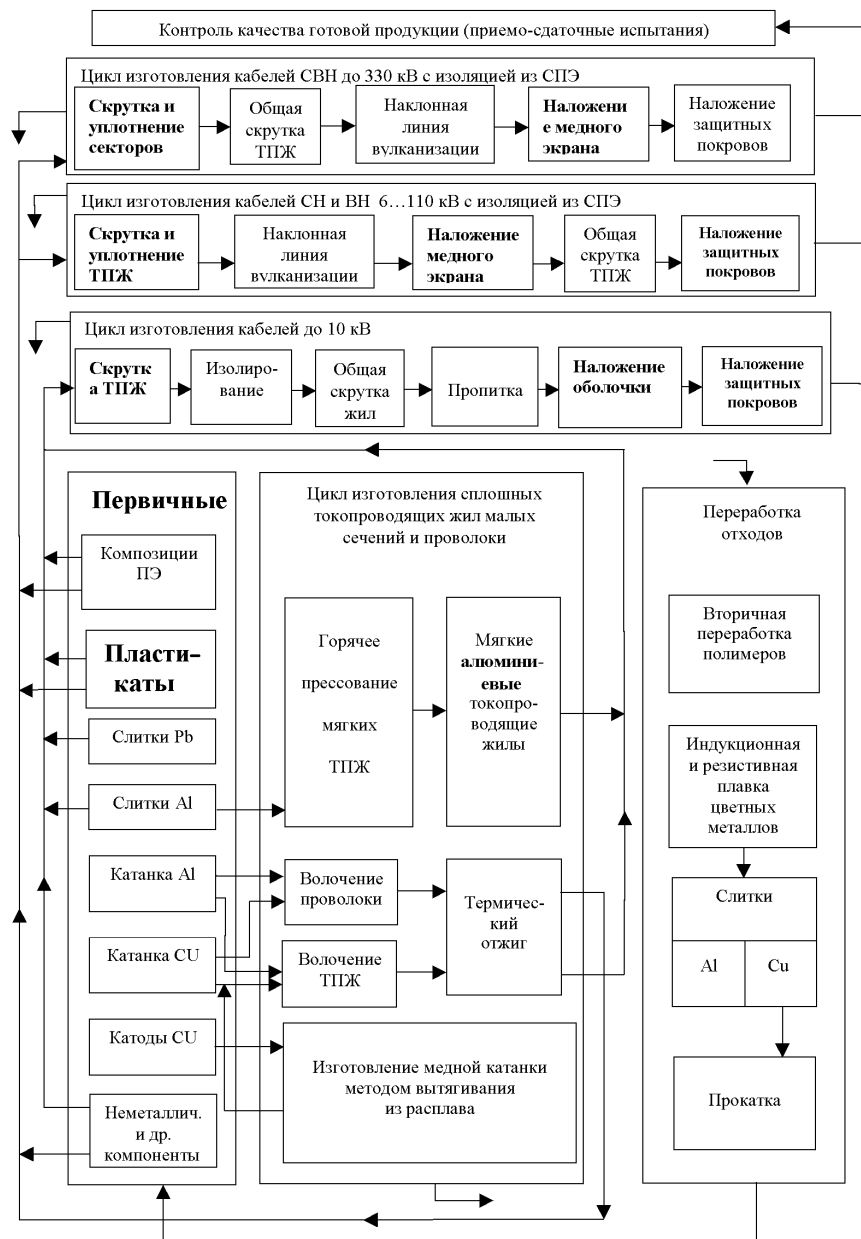


Рисунок 1 – Общая схема основных технологических процессов и циклов производства кабелей энергетического назначения с бумажной пропитанной и пластмассовой изоляцией

неизбежно появляются в процессе производства. Каждый из циклов изготовления кабелей завершается контролем качества готовой продукции и приемо-сдаточными испытаниями всех строительных длин и отрезков. Рассмотрим упомянутые структурные части более подробно.

Первичные компоненты. Для изготовления изоляции из сшитого полиэтилена применены как импортные компоненты (для силанольной и пероксидной сшивки), так и разработанные собственные составы на основе полиолефинов и органосиланов [1-4]. Для улучшения, в первую очередь, пожаробезопасности кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена были разработаны составы на основе поливинилхлоридного пластиката [5, 6]. Во всех этих разработках использовалась отечественная сырьевая база. Свойства таких материалов рассмотрены в [7, 8, 9].

Для изготовления свинцовых и алюминиевых оболочек кабелей с бумажно-масляной изоляцией по традиционной технологии прессования используются соответственно свинцовые и алюминиевые слитки. Новым является использование медных катодов для изготовления катанки методом вытягивания из расплава. К традиционно используемым неметаллическим исходным компонентам относится кабельная бумага для изоляции и проводящая бумага для экранов кабелей с бумажной пропитанной изоляцией, компоненты для приготовления пропиточных составов (в том числе нестекающих), изготовления защитных покровов и пр. К новым относятся материалы (нити и полотна) для водоблокирования в кабелях 6... 110... 330 кВ, металлополимерные пленки и т.п.

Цикл изготовления сплошных ТПЖ малых сечений и проволоки **существенно модернизирован за счет применения:**

- технологии горячего прессования алюминиевых ТПЖ сечением 30...240 кв.мм и катанки сечением более 30 кв.мм из алюминиевых слитков;
- применения безотходного процесса использования слитков алюминия за счет внедрения ЗАО завод «Южкабель» на Запорожском алюминиевом комбинате технологии безокислительного непрерывного литья слитков, что позволило полностью отказаться от их обточка и исключить целый производственный участок;
- применения высокопроизводительного волочильного оборудования и встроенного непрерывного термического отжига жил и медной проволоки в паровой среде;
- применение прогрессивного процесса изготовления мягкой медной катанки методом вытягивания из расплава (метод up cast).

Сюда следует отнести также применение алмазных волок с большим диаметром калибрующего пояса (до 6 мм) для волочения, а также уплотнения алюминиевых ТПЖ сечением до 120 кв.мм, например, для изготовления самонесущих изолированных проводов.

Вопросы, связанные с расчетом усилий волочения, допустимых обжатий,

разработки методик определения параметров волочения и выбора переходов на основе вариационного принципа рассмотрены в [10-18].

Применение процесса волочения дает возможность получать всю необходимую номенклатуру проволоки и фасонных токопроводящих жил сечением до 50 кв.мм из медной катанки.

Сплошные фасонные токопроводящие жилы в диапазоне сечений 70...240 кв.мм и всю номенклатуру катанки из алюминия дает возможность получать процесс горячего прессования из слитков на разработанной технологической линии.

В основу работы такой технологической линии положен принцип формообразования мягких изделий (секторных токопроводящих жил и других изделий) путем горячего прессования алюминиевых слитков. Линия состоит из гидравлической прессовой установки (собственно гидравлического пресса), системы гидравлики, печи индукционного нагрева слитков, приемного устройства, системы электропитания и системы управления (рис. 2).

Гидравлическая прессовая установка состоит из главного силового цилиндра 1, с поршнем 2 и прессштемплем, контейнера 3 с гильзой 4 и элементами индукционного подогрева контейнера 5 током промышленной частоты I_k , передней траверзы 6, матрицы 7. Для замены матрицы предусмотрены два вспомогательных гидроцилиндра (на рис. не показаны), обеспечивающие необходимое перемещение передней траверзы. Еще один вспомогательный гидравлический цилиндр используется как привод механизма подачи слитков от входа к выходу печи индукционного нагрева слитков. Основным узлом системы гидравлики является трехплунжерный насос Г-305А, развивающий давление 320 атм при подаче рабочей жидкости (минерального масла) 750 л/мин. Здесь же имеется также гидронасос механизма подачи слитков, обеспечивающий подачу рабочей жидкости 100 л/мин при давлении 25 атм. Основным элементом печи индукционного нагрева слитков является водоохлаждаемый индуктор 8. В электроприводе системы гидравлики использован двигатель постоянного тока МП 49,70-6К мощностью 500 кВт и скоростью вращения 315/1000 об/мин, питаемый напряжением 440 В. Система электропитания обеспечивает подачу и распределение промышленного трехфазного напряжения 50 Гц, 380 В между системами, узлами и элементами линии и их защиту в аварийных режимах работы.

Работает линия следующим образом. Алюминиевые слитки (5 штук подряд один за одним) подаются толкателем 9 механизма подачи слитков в печь индукционного нагрева, которая обеспечивает их основной нагрев до температуры 420°C. Для лучшей распрессовки в гильзе контейнера и во избежание образования воздушных раковин, перед подачей слитка в контейнер, передняя часть его нагревается до более высокой температуры, составляющей примерно 450°C. Этот, так называемый градиентный нагрев слитка, обеспечивается переключением числа витков индуктора 9 с помощью тиристорных коммутаторов узла управления нагревом слитков. Подготовленный таким способом сли-

ток движется сам по направляющим роликам, как показано стрелкой и устанавливается на оси прессштемполя и матрицы 7. Прессштемпель, приводимый в движение поршнем главного силового цилиндра подает слиток во внутреннюю полость гильзы 4 контейнера 3. После этого начинается прессование слитка на

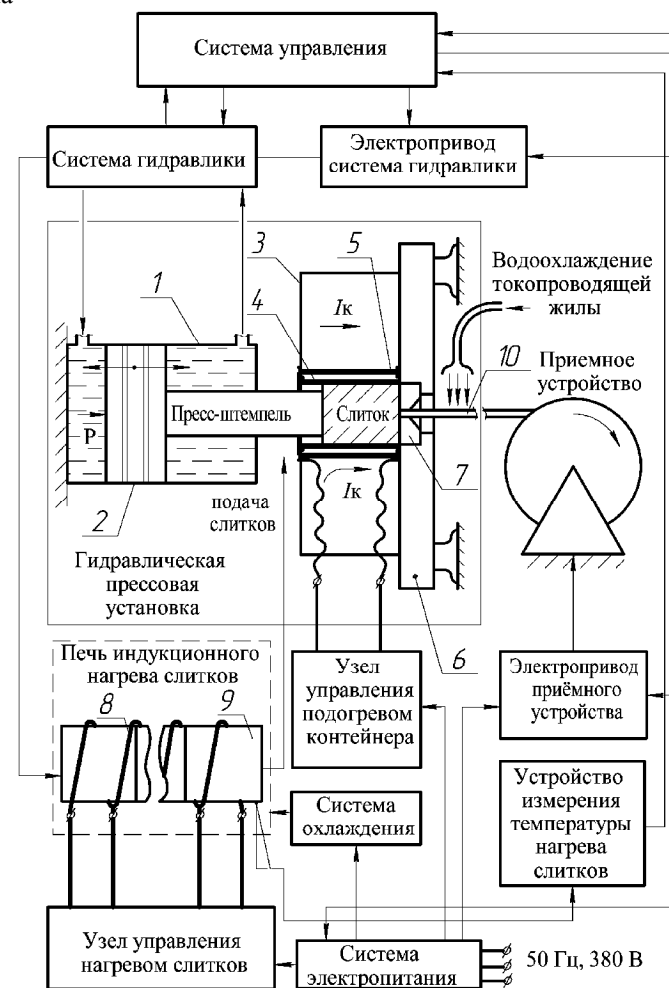


Рисунок 2 – Структурная схема технологической линии изготовления токопроводящих алюминиевых жил методом горячего прессования

прямой матрице 7 усилием P , развиваемым поршнем главного силового цилиндра 1, максимальное значение которого составляет 1250 т. Так как передняя часть слитка нагрета сильнее, то именно в этой части происходит заполне-

ние гильзы алюминием и его выдавливание через матрицу 7. Синхронно с движением прессштемпера начинается работать приемное устройство и готовая выпрессованная токопроводящая жила 10 укладывается на барабан (№ 14... № 20), устанавливаемый на этом приемном устройстве. Сразу после выхода из матрицы токопроводящая жила в процессе движения охлаждается водой. После выпрессовывания слитка в гильзе остается некоторый пресс-остаток. Прессштемпер отводится назад и механизм подачи слитков подает следующий нагретый до необходимой температуры слиток. Прессштемпер снова подает слиток в гильзу контейнера, а передняя, нагретая сильнее часть слитка под давлением сваривается с прессостатком и происходит его выпрессовывание. Далее процесс повторяется циклически.

На выходе из печи индукционного нагрева слитков, их температура измеряется выдвижной термопарой, а сам процесс нагрева контролируется системой управления. Время перезарядки слитка диаметром 175 мм и длиной 418 мм составляет 20 с. Выбранные параметры линии позволяют прессовать токопроводящие жилы сечением 70...240 кв.мм со скоростью 120 м/мин в один или два ручья. Линия имеет длину 29,15 м, ширину 11,4 м и высоту – 2,78 м. Ее масса составляет 66,7 т, а установленная мощность (без печи) – 515 кВт.

Цикл изготовления кабелей до 10 кВ включает в себя как изготовление кабелей с бумажной пропитанной изоляцией по традиционной технологии, так и изготовление кабелей с пластмассовой изоляцией на упомянутое напряжение. Новым является применение изоляции из силанольносшитого полиэтилена на основе как импортируемых, так и разработанных [1-4] компонент на напряжение до 10 кВ (с круглыми экранированными жилами) и на напряжение до 6 кВ с секторными жилами. Существенно улучшена пожаробезопасность кабелей за счет применения (в покровах) не распространяющих горение (нг) составов, и составов с низким газодымовыделением (нгд) [5, 6]. Здесь использована традиционная схема общей скрутки изолированных жил с помощью планетарной крутильной машины (МКРА). Такая схема при приемлемом диаметре вращающейся планетарной клетки, обеспечивающей открутку, позволяет разместить на ней максимум 3 барабана № 15, то есть диаметром 1500 мм, что в сочетании со вспомогательным устройством позволяет скручивать сердечник кабеля, состоящий максимум из четырех жил, сечением, как правило, не более 240...300 кв.мм для обеспечения заданных строительных длин кабелей.

Именно эта схема скрутки является главной причиной, которая не позволяет скручивать жилы сечением выше 300 кв.мм.

Для этого цикла изготовления характерными являются использование пластмассовой изоляции электрическим напряжением на проход в технологических линиях. В [19] были рассмотрены физические процессы, приводящие к транспорту электрических зарядов замкнутым слоем диэлектрика на проводящей подложке. В [20-22] приведены методики определения токов переноса и

основанные на этом критерии применения испытательных средств и испытаний изоляции высоким напряжением на проход в технологических экструзионных линиях.

Циклы изготовления кабелей 110 и 330 кВ. В этих циклах были применены новые принципы скрутки и наложения изоляции с помощью строенной экструзионной головки. Ниже рассматриваются основные особенности этих процессов с точки зрения их практической реализации.

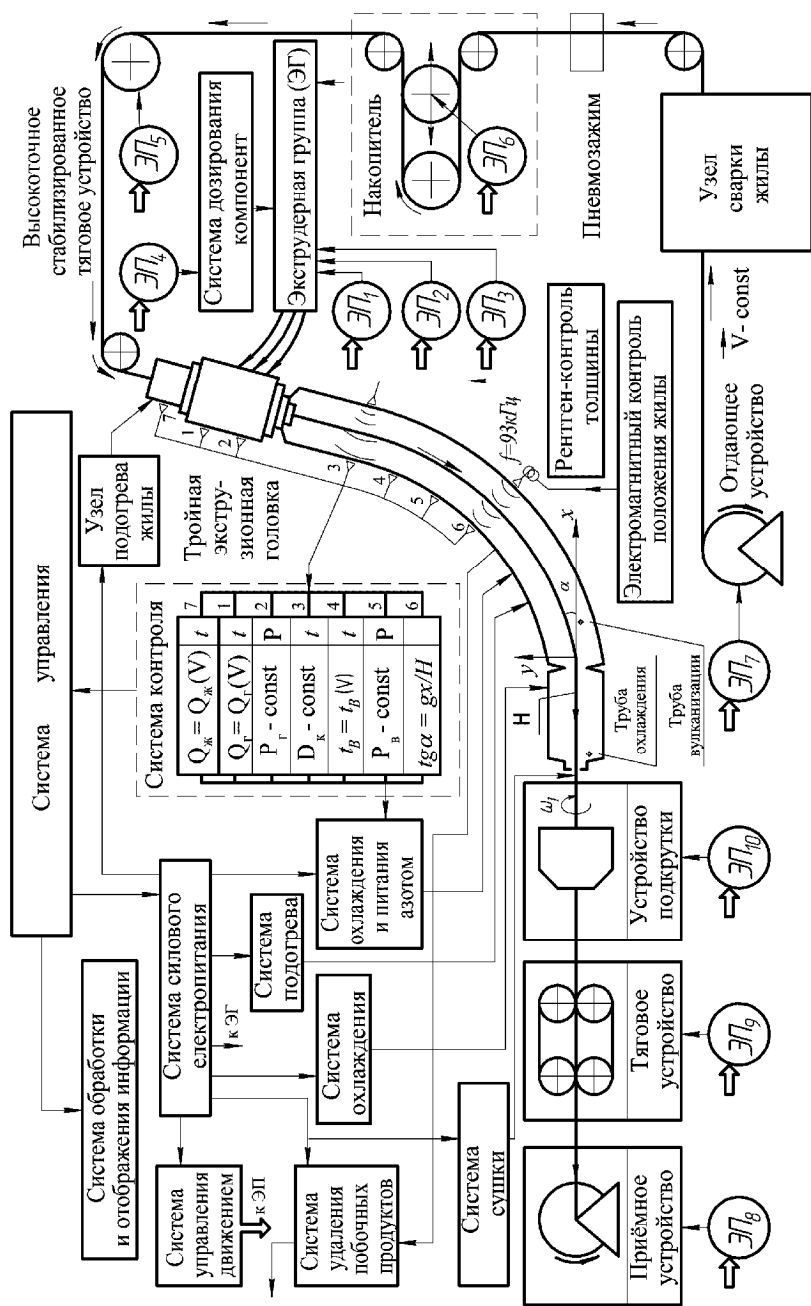


Рисунок 3 – Функциональная схема наклонной линии вулканизации

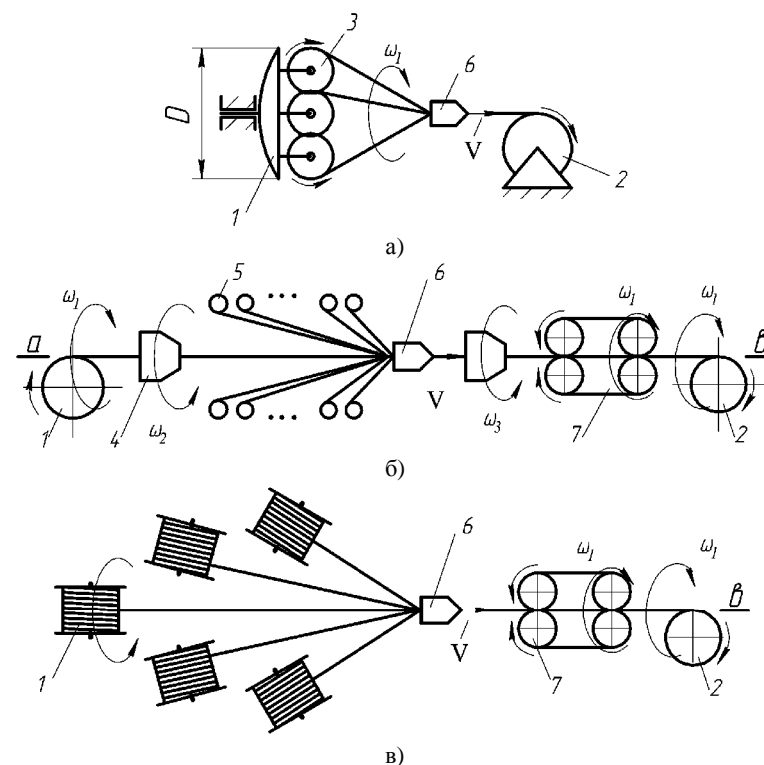


Рисунок 4 – Схемы скрутки: традиционная (а), с вращающимся тяговым устройством (б, в), при наложении проволоочного экрана (б), общей скрутки жил (в)

Главной составной частью технологии изготовления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ является наклонная линия вулканизации полиэтилена в среде сжатого до 15 атм сухого азота (рис. 3). Основные закономерности работы такой линии приведены в [23]. В ней использован принцип наложения трехслойной изоляции строенной экструзионной головкой на свободно провисающую в вулканизационной трубе токопроводящую жилу. Постоянная провисания жилы составляет 130 м. При изменении сечения жилы усилие H в нижней точке обеспечивается регулируемым широтно-импульсным приводом тягового устройства. Устройство подкручивания жилы обеспечивает ее осевое кручение с шагом около 15 м и получение, за счет более эффективного охлаждения, корочки тонкого слоя застывшего полиэтилена на внешней поверхности изоляции, что препятствует ее стеканию вдоль жилы и возникновению эксцентриситета.

Схемы скрутки могут быть построены по различным принципам (рис. 4). Традиционный принцип скрутки (рис. 4, а) использует вращение отдаю-

щего устройства 1 (или клетки крутильной машины) с угловой скоростью ω_1 , а приемное устройство обеспечивает поступательную линейную скорость V . Соотношением ω и V определяется шаг скрутки готового изделия. Главный недостаток такой схемы – большой диаметр крутильной клетки D , который примерно втрое больше диаметра барабана 3 с наносимыми элементами скрутки (проволокой, готовыми изолированными жилами и т.п.). Так, например, при применении отдающих барабанов 3 диаметром всего 1,6 м в таких схемах диаметр клетки D уже составляет около 5 м. Диаметры кабелей на напряжение 110...330 кВ составляют 70 мм и более, что требует применение барабанов размером 2...3 или даже 3,6 м. Это обстоятельство делает практически невозможным применение традиционных схем общей скрутки жил или наложения проволочных элементов.

Поэтому, для изготовления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена применен принцип вращения самого кабеля вокруг собственной оси с помощью вращающихся (вокруг этой же оси со скоростью ω_1) тягового, отдающего и приемного устройства (рис. 4, б, в) одновременно в одну сторону.

Этот принцип был использован при разработке схемы наложения проволочного экрана (рис. 4, б) и общей скрутки изолированных жил (рис. 4, в), или скрутки жил большого сечения (более 1000 кв.мм), состоящих из пяти предварительно скрученных и уплотненных секторных жил кабелей 6...330 кВ.

При наложении проволочного экрана схема скрутки работает так (рис. 4, б). Сердечник кабеля сходит с отдатчика 1 и проходит сквозь обмотчик для наложения методом обмотки полупроводящего водоблокирующего полотна. Проволоки, из которых состоит экран, сходят из неподвижных катушек 5, число которых может достигать 96 штук. Скрутка экрана происходит в калибре 6 за счет вращения сердечника кабеля вокруг собственной оси, что обеспечивается вращением отдающего устройства 1, приемного устройства 2 и тягового устройства 7 с угловой скоростью ω_1 . На экран из медных проволок в соответствии с разработанными техническими условиями Украины на такие кабели накладываются 2 медные ленты в противоположную наложению проволок сторону.

При общей скрутке жил (рис. 4, в) с неподвижных отдающих устройств 1 сходят 5 жил и скручиваются в калибре 6 за счет вращения тягового устройства 7 и приемного устройства 2 с угловой скоростью ω_1 вокруг оси кабеля. Кроме того, отдающие устройства могут вращаться в сторону, противоположную направлению общей скрутки и тем самым обеспечивать открутку круглых жил. При общей скрутке жил большого сечения из пяти секторов последние уже уложены на барабан с подкруткой и их открутка не производится.

Применение принципа скрутки за счет вращения самого кабеля вокруг собственной оси позволяет принципиально решить задачи разработки технологических схем наложения проволочного экрана, брони, проводящих и полупроводящих лент в экране для диаметров кабеля 70 мм и более при диаметрах

барабана приемного устройства до 3,6 м и общей высоте крутильной машины практически определяемой только этим габаритом. Реализовать такую технологическую схему при использовании традиционных схем скрутки с вращающимися клетями, например, при количестве отдающих катушек равном 96 (как это необходимо при наложении экрана) было бы практически невозможно. Следует отметить [24], что получение коэффициента заполнения сечения жилы металлом 0,75 и выше невозможно получить для круглых жил без их уплотнения.

Описанные выше схемы позволяют получать общий коэффициент заполнения не менее 0,85 даже для составных жил, скрученных из пяти предварительно уплотненных секторных жил. Это позволяет технологически решить вопросы изготовления жил крупных сечений (до 2000 кв.мм) для кабелей на напряжение до 330 кВ.

Применение этих принципов позволило разработать и реализовать впервые в СНГ и Украине промышленный выпуск кабелей с изоляцией из теплоустойчивого сшитого полиэтилена на напряжение 6...330 кВ [25-30].

Контроль качества готовой продукции (приемо-сдаточные испытания) включают в себя, прежде всего, проверку всех строительных длин переменным напряжением, для кабелей до 110 кВ – контроль уровня частичных разрядов (ЧР), а для кабелей напряжением свыше 150 кВ – дополнительно измерение угла диэлектрических потерь в изоляции, который может сильно изменяться в зависимости от удельной проводимости материала полупроводящих пластмассовых экранов по жиле и по изоляции [31]. Основные параметры и схемы испытательных установок с использованием принципа резонансного возбуждения колебательного контура приведены в [23, 32-35]. Как показали исследования, собственный уровень шумов установок для контроля уровня ЧР не превосходит 1 пКл.

В заключение остановимся на определении основных параметров индукционного нагрева слитков при изготовлении алюминиевых ТПЖ небольших сечений. Этот процесс является достаточно сложным и описывается решением уравнения Бесселя для проникновения поля в цилиндрический слиток. К тому же при нагреве изменяются сопротивления материала индуктора и слитка. Однако, учитывая, что индуктор охлаждается водой, можно считать его температуру постоянной так же, как и температуру слитка, и равной, примерно, 400 °С. При этих допущениях получим оценку параметров сверху. Приняв такое условие стационарности, положим далее, что индуктор и слиток представляют вместе короткозамкнутый воздушный трансформатор, в котором одновитковая вторичная обмотка является полым цилиндром и имеет толщину, равную глубине проникновения поля Δ в материалах слитка. Тогда к данной модели можно применить ту же теорию, которая разработана для случая короткого замыкания во вторичной обмотке трансформатора.

В режиме короткого замыкания индуктивность рассеяния обоих обмоток будет равной [36]

$$L = \mu_0 n_1 \delta (Ck/h), \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная вакуума; n_1 – количество витков первичной обмотки; C – средняя длина витка обеих обмоток; k – коэффициент приведения высоты обмотки к расчетной длине линий поля рассеяния (принимается равным 0,95); h – высота первичной обмотки; δ – приведенная ширина зазора между обмотками.

Средняя длина витка обеих обмоток C и приведенная ширина зазора δ между обмотками соответственно равны

$$C = (C_1 + C_2)/2; \quad (2)$$

$$\delta = \delta_{12} + (b_1 + b_2)/3, \quad (3)$$

где $C_1 = \pi D_1$, $C_2 = \pi D_2$ – соответственно средняя длина витка первичной и вторичной обмоток, имеющих средние диаметры D_1 и D_2 ; δ_{12} – действительное значение зазора между обмотками 1 и 2; b_1 , b_2 – толщина первичной и вторичной обмоток соответственно.

Здесь значение b_2 следует принять равным глубине Δ проникновения поля в нагреваемый слиток.

Тогда, потребляемый первичной обмоткой комплексный ток будет равен

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R + jWL}, \quad (4)$$

где W – угловая частота напряжения; \underline{U} – комплексное напряжение первичной обмотки; $R = R_1 + R'_2$ – общее активное сопротивление; R_1 – активное сопротивление первичной обмотки; R'_2 – активное сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичной; j – мнимая единица.

Действительное значение R_2 определяется через глубину проникновения поля в материал слитка, как

$$R_2 = r \frac{2p(D_C - \Delta/2)}{h \cdot \Delta}, \quad (5)$$

где r – удельное сопротивление материала слитка; D_C – диаметр слитка.

Учитывая то, что при градиентном нагреве применяется переключение витков первичной обмотки, под h следует понимать суммарную высоту всех витков, включенных последовательно.

Глубина проникновения поля

$$\Delta \sqrt{2r/(wm)} \quad (6)$$

в материал слитка определяется в данном случае только его проводимостью и угловой частотой напряжения.

Используя теперь (1)...(6) можно определить величину тока, косинус угла нагрузки и мощность, выделяемую в слитке в первом приближении, принимая процесс адиабатическим за время нагрева слитка, и считая начальное удельное сопротивление его материала равным ($\rho = 28,2 \cdot 10^{-9}$ Ом · м)

Как показывают расчеты, такой короткозамкнутый трансформатор имеет косинус угла φ нагрузки около 0,9 и для компенсации индуктивной составляющей следует применять батареи косинусных конденсаторов, с помощью которых всегда можно добиться $\cos \varphi$ примерно равного единице.

Выводы. Предложены технологические схемы и принципы построения современных электротехнологических комплексов производства в Украине, позволяющие решить проблему промышленного выпуска в Украине современных силовых кабелей энергетического назначения напряжением до 330 кВ.

Список литературы: 1. Патент на винахід № 83826, Україна, МПК С 08L 83/04. Здатна до зшивання композиція / Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 01.11.2005, опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16. 2. Патент на винахід № 83827, Україна, МПК С 08L 83/04. Здатна до зшивання композиція / Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 01.11.2005, опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16. 3. Патент на винахід № 83828, Україна, МПК С 08L 83/04. Здатна до зшивання композиція / Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 01.11.2005, опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16. 4. Патент на винахід № 84D12, Україна, МПК С 08L 83/04. Здатна до зшивання композиція / Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 01.11.2005, опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17. 5. Патент на винахід № 85909, Україна, МПК H01 В 9/00. Кабель силовий / Золотарьов В.М. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 23.05.2007, опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22. 6. Патент на винахід № 85912, Україна, МПК H01 В 9/00. Кабель силовий вогнестійкий / Золотарьов В.М. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 23.05.2007, опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5. 7. Василець Л.Г., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Ганьшина Л.В., Чулеева Е.В. Получение и свойства пространственно-структурированных полиолефинов для кабельных композиций // Труды 25-й междунауч. конф. «Композиционные материалы в промышленности». – Ялта. – 2005. – С. 269-272. 8. Щербенюк Л.А., Золотарев В.М., Гурич А.Г., Голик О.В. Исследование корреляции электрических и механических параметров двойной изоляции эмальпроводов // Электротехника и электромеханика, № 2. – 2005. 9. Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Василець Л.Г., Тулєєва О.В. Надійність кабельно-провідникової продукції. Методи підтвердження на основі експериментальних досліджень // Вісник НТУ «ХПІ». – № 34. – 2006. – С. 3-17. 10. Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Определение усилия волочения фасонных токопроводящих жил // Труды 5-й междунауч. конф. «Электрические материалы и компоненты». – М.: МЭИ. – 2004. – С. 152-153. 11. Золотарев В.М., Бузько С.В., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Приближенные соотношения для определения предельных обжатий при волочении круглых медных и алюминиевых профилей для жил кабелей и проводов // Междунауч.-техн. сборник «Резание и инструмент в технологических системах». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – Вып. 67. – С. 206-207. 12. Золотарев В.М., Бузько С.В., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Понятие геометрического фактора волочения инструмента и его использование в практических вычислениях // Труды 9-й Международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». – Харьковская научно-производственная корпорация «ФЭД». – 204. – С. 94-96. 13. Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В. Методика определения допустимых обжатий на первом переходе при волочении круглой проволоки электротехнического назначения из меди и алюминия // Вестник НТУ «ХПИ» «Технологии в машиностроении». – 2005. – Вып. 12. – С. 92-95. 14. Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В. Исследование допустимых обжатий на первом переходе при волочении круглой проволоки электротехнического назначения из меди и алюминия // Материалы 3-й международной научно-технической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». Ч. 1. – Курск: Курский ГТУ. – 2005. – С. 152-156. 15. Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В. Определение силовых параметров при волочении токопроводящих жил силовых кабелей // Вестник НТУ «ХПИ» «Технологии в машиностроении». – 2006. – Вып. 28. –

С. 67-71. **16.** Золотарев В.М. Оценка электрической напряженности токопроводящей жилы в ионизированном газе // Труды 12-й международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». Харьков: ХНПК «ФЭД», 2006. – С. 241-245. **17.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Бузько С.В. Моделирование переходов при волочении фасонных профилей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 7. – С. 6-11. **18.** Науменко А.А., Золотарев В.М. Метод определения диагональных элементов матриц, соответствующих ядрам интегральных уравнений. Фредгольма для расчета плоскопараллельных безвихревых полей различной физической природы // Вестник НТУ «ХПИ». – № 37. – 2006. – С. 149-155. **19.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В. Определение силовых параметров волочения в условиях кабельного предприятия // Труды 11-й международной конференции ICEEE, ч. 1. – М.: Технический университет «МЭИ». – С. 52-54. **20.** Золотарев В.М. и др. Диэлектрические потери в движущейся кабельной изоляции // Труды 11-й междуна. конф. ICEEE. – М.: МЭП. – 2006, 4.1. – С. 54-55. **21.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В. Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей // Труды 12-й междуна. научно-техн. конф. «Физические и компьютерные технологии». – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2006. – С. 239-240. **22.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Золотарев В.В. Физические процессы, приводящие к транспорту электрических зарядов слоем диэлектрика на проводящей подложке // Вестник НТУ «ХПИ». – 2005. – Вып. 42. – С. 3-15. **23.** Золотарев В.В., Карпушенко В.П., Науменко О.А., Золотарев В.М. Основні закономірності роботи похилої екструзійної лінії для виготовлення силових кабелів на напругу до 330 кВ та їх заводських випробувань // Вісник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 44. – С. 44-52. **24.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Предельные значения коэффициента заполнения для скрученных круглых уплотненных жил кабелей, проводов и шнуров // Труды междуна. симпозиума ЭЛМАШ-2006 «Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования». Т. 2. – М.: Интерэлектромаш. – 2006. – С. 190-192. **25.** Золотарев В.М., Антоненко Ю.А., Золотарев В.В. Самонесущие изолированные провода: особенности конструкции и перспективы развития производства в Украине // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 34. – С. 12-17. **26.** Золотарев В.М., Обозный А.Л. Новые отечественные разработки в области силовых кабелей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 34. – С. 129-132. **27.** Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Науменко А.А., Золотарев В.В. Отечественные разработки кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжений // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – № 20. – С. 87-95. **28.** Патент на винахід № 60284, Україна, МПК 7 H01 B9/02. Кабель силовий пожежобезпечний (Золотарев В.М. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 30.07.03, опубл. 26.05.08, Бюл. № 10. **29.** Патент на винахід № 60285, Україна, МПК 7 H01 B9/02. Кабель силовий пожежобезпечний (Золотарев В.М. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 30.07.03, опубл. 10.12.08, Бюл. № 23. **30.** Патент на винахід № 60266, Україна, МПК 7 H01 B9/02. Кабель силовий екранований і водозахищений (Золотарев В.М. та ін.; заявник та патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявл. 30.07.03, опубл. 10.01.08, Бюл. № 1. **31.** Золотарев В.В., Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Науменко А.А. Распределение стационарного электрического поля в цилиндрическом неидеальном диэлектрике // Электротехника и электромеханика. – 2008. – № 4. – С. 65-69. **32.** Набока Б.Г., Лактионов С.В., Золотарев В.М., Антоненко Ю.А., Карпушенко В.П. Поле концевой муфты для подключения кабеля к установке измерения ЧР // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 34. – С. 60-66. **33.** Набора Б.Г., Гурич А.Г., Золотарев В.М., Нечаус А.А. Обоснование допустимых режимов эксплуатации резонансных установок для диагностики кабелей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2005. – № 42. – С. 86-93. **34.** Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Кривенко А.Ф., Золотарев В.В., Науменко А.А. Энергосберегающие схемы испытаний кабелей с полиэтиленовой изоляцией // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 21. – С. 55-66. **35.** Золотарев В.М., Обозный Л.А. Перспективы развития силовых кабелей в электроэнергетике Украины // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 9. – С. 33-36. **36.** Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 1. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 464 с.

Поступила в редколлегию 11.08.2009

УДК 621.373

Н.Н.ИГНАТЕНКО, канд.техн.наук, зав.сектором, НТУ «ХПИ»

ВЫБОР ДЛИНЫ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ РАЗРЯДНИКОВ ЗАМЫКАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ В КРОУБАР- ГЕНЕРАТОРАХ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА МОЛНИИ

Запропоновано метод розрахунку в високоефективних генераторах великих імпульсних струмів блискавки (ГВІСБ) довжини робочих проміжків некерованих повітряних стержневих розрядників замикачів RL-навантаження. Показано, що спрацювання вказаних некерованих розрядників кроубар-замикачів відбувається в момент часу, близький до моменту досягнення струмом в RL-навантаженні свого максимального значення. При цьому у навантаженні формується імпульс струму блискавки, амплітудно-часові параметри (АЧП) якого відповідають вимогам ГОСТ 30585-98.

Method of calculation of length of working gaps of uncontrolled air rod dischargers of RL-load closers in high-efficiency generators of high pulsed currents of lightning (GHPCL) has been proposed. It was shown that operation of above-mentioned uncontrolled dischargers of crowbar-closers occurs in the moment of time which is close to the moment when the current in RL-load reaches its maximal value. During this, lightning current pulse is formed in the load that (pulse) has amplitude-time parameters (ATP) that conform to the requirements of All-Union state standard GOST 30585-98.

Введение. Для получения больших импульсных аperiodических токов в ТВН достаточно часто применяются генераторы с использованием кроубар-замыкателей нагрузки [1]. В разрядной цепи таких классических генераторов применяют управляемые вакуумные разрядники замыкателей RL-нагрузки, которые, благодаря использованию мощных генераторов поджигающих импульсов (ГВПИ), срабатывают в момент достижения током в нагрузке своего максимального значения [2]. Разработанные в последнее время генераторы больших импульсных токов молнии (ГБИТМ) содержат рационально выбранные корректирующие емкости $C_{к1} = C_{к2}$, два замыкателя нагрузки с неуправляемыми воздушными (атмосферного давления) стержневыми разрядниками замыкателями RL-нагрузки. Указанные генераторы тока молнии позволяют отказаться от применения мощных ГВПИ и достаточно стабильно работают при рабочих напряжениях емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) до напряжений 1,9 МВ [3-5]. К основным трудностям, возникающим при проектировании и эксплуатации высоковольтных генераторов ГБИТМ, следует отнести рациональный выбор длины воздушных промежутков неуправляемых воздушных разрядников кроубар-замыкателей нагрузки. Необходимо отметить, что для достижения высокого коэффициента полезного действия (КПД) генератора указанные разрядники кроубар-замыкателей должны срабатывать в момент времени, близкий к моменту достижения током в нагрузке ГБИТМ своего максимального значения.

Таким образом, **цель работы** состоит в рациональном выборе длины воздушных зазоров неуправляемых стержневых разрядников кроубар-